

На правах рукописи

Раводин

Раводин Илья Владимирович

РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА КОЛЕБАНИЙ НЕРАЗРЕЗНЫХ УПРУГО
ОПЕРТЫХ КОНСТРУКТИВНО-НЕЛИНЕЙНЫХ БАЛОЧНЫХ СИСТЕМ ПРИ
ДВИЖУЩЕЙСЯ НАГРУЗКЕ

Специальность 2.1.9. Строительная механика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Гриднев Сергей Юрьевич**
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры строительной механики ВГТУ,
действительный член Академии транспорта РФ

Официальные оппоненты: **Зылев Владимир Борисович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Строительная механика»,
РУТ (МИИТ)

Глушков Сергей Павлович
доктор технических наук, профессор
кафедры «Технология транспортного
машиностроения и эксплуатация машин», СГУПС

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»**

Защита состоится «20» декабря 2024г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.05 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет» по адресу: 394026, ул. 20-летия Октября, 84.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте <https://schgou.ru/> ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».

Автореферат разослан «07» октября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Макеев
Алексей Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При расчете целого ряда строительных и машиностроительных конструкций на движущуюся нагрузку в качестве расчетных схем используют конструктивно-нелинейные упруго опертые балочные системы. Особенностью таких конструкций является изменение расчетной схемы в процессе нагружения. Переход к новой расчетной схеме происходит в результате замыкания и размыкания зазоров, включения в работу новых связей с возможностью дальнейшего их выключения.

К данному классу конструкций относятся: балки конвейерных галерей и трубопроводы на пружинных опорах; неразрезные пролетные строения и балки крановых путей, установленные на РОЧ или выполненные с применением разнообразных адаптивных систем сейсмозащиты. Сюда относятся и наплавные мосты неразрезной системы с ограничительными опорами. Анализ динамического поведения балок при различных условиях нагружения выполняется при разработке ряда микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Численное моделирование колебаний конструктивно-нелинейных упруго опертых балочных систем при движущейся нагрузке представляет собой сложную задачу. Как правило для аппроксимации решения используется метод Галеркина. Включение в работу ограничительных опор приводит к необходимости переподчинять базисные функции в ходе динамического нагружения. Реализация такого алгоритма в свою очередь требует организации дополнительных уточняющих итерационных процедур для получения устойчивого решения. Такого же рода трудности возникают при построении конечно-разностных вычислительных алгоритмов и использовании современных программ конечно-элементного (КЭ) анализа.

На сегодняшний день в технической литературе и нормативных документах отсутствуют практические рекомендации по выбору рационального соотношения параметров для упруго опертых балочных систем с ограничительными опорами, что снижает качество проектных решений. В связи с этим, имеется необходимость разработки универсального и достоверного способа моделирования колебаний упруго опертых конструктивно-нелинейных балочных систем при движущейся нагрузке, а также подготовки практических рекомендаций по выбору их основных параметров.

Степень разработанности темы исследования. Исследования по разработке методик анализа колебаний конструктивно-нелинейных систем приведены в работах Н.А. Барченковой, Р.Х. Биджиева, В.А. Гордона, С.Ю. Гриднева, Н.В. Ключевой, В.И. Колчунова, А.А. Лукашевича, А.В. Перельмутера, И.М. Рабиновича, А.Н. Потапова, В.И. Сливкера, А.А. Холодова, Ю.Т. Чернова и др.

Большой вклад в формирование теории анализа балочных систем при подвижной нагрузке внесли А.И. Ананьин, А.В. Александров, А.Г. Барченков, Н.Г. Бондарь, В.В. Болотин, М.Ф. Вериги, И.И. Гольденблат, Ю.Г. Козьмин, Л.Я. Коган, С.С. Кохманюк, А.И. Крылов, А.Б. Моргаевский, Г.Б. Муравский, И.М. Рабинович, В.С. Сафронов, А.П. Филиппов, С.П. Тимошенко, Н.Н. Шапошников, С. Н. Шаповалов, S.E. Inglis, L. Fryba, A. Schallenkamp и др.

Применение метода конечных элементов к расчету пролетных строений на подвижную нагрузку рассматривали в своих работах И.В. Алферов, Ю.В. Архипенко, В.Б. Бабаев, Д.Г. Грошев, Л.К. Дьяченко, В.Б. Зылев, И.И. Иванченко, Г.М. Кадисов, Е.А. Круговова, С.К. Катаев, Г.В. Михеев, Г.В. Полторац, Н.Н. Шапошников, İsmail Esen, Gui Shuirong, Huan-huan Wang и др.

Анализ состояния вопроса показывает, что используемые методы динамического расчета конструктивно-нелинейных систем при движущейся нагрузке имеют ограниченную область применения и требуют дальнейшего развития. В нормативных документах отсутствуют рекомендации по выбору рационального соотношения параметров для упруго опертых балочных систем с ограничительными опорами.

Цель диссертационной работы – совершенствование методики моделирования конструктивно-нелинейных колебаний упруго опертых балочных систем при движущейся нагрузке для достоверного прогнозирования их динамического поведения и выбора рациональных параметров при принятии проектных решений.

Задачи исследования.

1. Построить вычислительный алгоритм для достоверного прогнозирования поведения конструктивно-нелинейных упруго опертых балочных систем при движущейся нагрузке в широком диапазоне параметров.

2. Спроектировать и изготовить универсальную лабораторную установку для проведения серии экспериментов с целью верификации предложенного вычислительного алгоритма.

3. Разработать конечно-элементную модель движущейся нагрузки и конструктивно-нелинейной балочной системы в современном программном комплексе для выполнения расчетов в пространственной постановке с учетом инерции груза и эффекта «обратной связи», влияния неровностей покрытия.

4. Выполнить сравнительный анализ результатов численных и лабораторных экспериментов на примере моделирования конструктивно-нелинейных колебаний шарнирно опертой балочной системы с упругими и ограничительными опорами.

5. Подготовить с помощью вычислительного алгоритма рекомендации, позволяющие подбирать рациональные соотношения параметров при назначении длины пролетов, жесткости балки и упругих связей, величины зазоров ограничительных опор.

6. Апробировать методику совместного моделирования балочной системы и подвижной нагрузки в конечно-элементном комплексе LS-Dyna для решения прикладных задач.

Методы исследования. В работе использованы положения строительной механики, динамики сооружений, динамики машин и механизмов, а также методы математического моделирования, основанные на вариационных принципах, методе конечных элементов, теории обобщенных функций. Для конечно-элементного моделирования использовался лицензионный, аттестованный в ФБУ «НТЦ ЯРБ» на расчеты нелинейных динамических задач программный комплекс ANSYS/LS-Dyna (регистрационный № 580 от 31 марта 2023 г.).

Научная новизна работы.

1. Разработан вычислительный алгоритм решения дифференциальных уравнений движения балки с изменяющимися граничными условиями с использованием кусоч-

но-линейных базисных функций, позволяющий избежать вычислительных трудностей при неблагоприятном сочетании параметров и включении в работу ограничительных опор.

2. Разработана лабораторная установка, которая обладает высокой степенью универсальности и позволяет моделировать конструктивно-нелинейные колебания балочных систем под действием различных видов динамических нагрузок.

3. Выполнена адаптация оптического метода измерения линейных перемещений для построения графиков колебаний характерных сечений физической модели конструктивно-нелинейной балочной системы.

4. Разработаны рекомендации по построению совместной конечно-элементной модели движущейся нагрузки и балочной системы в программном комплексе нелинейной динамики LS-Dyna с использованием алгоритма контакта элементов для решения задачи в постановке Моргаевского-Фрыбы-Барченкова.

5. С помощью разработанного вычислительного алгоритма установлены области рационального соотношения параметров упруго опертой балочной системы с ограничительными опорами при движущейся нагрузке.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Разработанный вычислительный алгоритм с использованием кусочно-линейных базисных функций реализован в системе компьютерной математики Matlab для выполнения параметрических исследований поведения конструктивно-нелинейных упруго опертых балочных систем при движущейся нагрузке.

2. С помощью лабораторной установки накоплен обширный и достоверный эмпирический материал для исследования динамического поведения упруго опертых балочных систем с ограничительными опорами при движущейся нагрузке. Благодаря универсальности конструкции, экспериментальная установка может быть использована как для анализа поведения целого ряда эксплуатируемых пролетных строений, так и в учебных и методических целях при проведении лабораторных работ по динамике сооружений.

3. Предложенный способ совместного конечно-элементного моделирования движущейся нагрузки и балочной системы в современной программе LS-Dyna позволяет выполнять комплексный динамический анализ колебаний несущих конструкций в строительстве и машиностроении.

4. Подготовлены рекомендации, позволяющие установить рациональные соотношения значений жесткостей балки и упругих связей, длин пролетов, величин зазоров ограничительных опор на стадии проектирования.

На защиту выносятся:

1. Модифицированная математическая модель упруго опертой балочной системы с изменяющимися граничными условиями, находящейся под действием совокупности сил, в том числе от динамического давления движущейся нагрузки.

2. Вычислительный алгоритм решения дифференциальных уравнений в частных производных с использованием кусочно-линейных базисных функций.

3. Результаты экспериментального анализа свободных и вынужденных колебаний балочной системы с промежуточными упругими и ограничительными опорами.

4. Предложенный способ моделирования совместных колебаний системы «конструктивно-нелинейная упруго опертая балка с ограничительными опорами – движущаяся нагрузка» с помощью алгоритма контакта элементов в LS-Dyna.

5. Результаты сравнительного анализа измеренных и расчетных значений перемещений балки в характерных точках для проверки достоверности методик численного моделирования колебаний динамической системы.

6. Полученные закономерности динамического поведения упруго опертой балочной системы с ограничительными опорами при подвижной нагрузке в зависимости от соотношений динамических параметров.

Достоверность результатов подтверждается корректностью математической постановки в пределах принятых допущений, а также удовлетворительным совпадением результатов численного моделирования колебаний динамических систем с результатами экспериментов и известными решениями других авторов.

Апробация работы. Результаты исследований и основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

– XXVII Российско-Словацко-Польский научно-практический семинар «Теоретические основы гражданского строительства» – Ростов-на-Дону, 2018 г.

– 24-я Международная конференция «Механика-2019» – Каунас, Литва, 2019 г.

– XXIX Российско-Словацко-Польский научно-практический семинар «Теоретические основы гражданского строительства» – Вроцлав, Польша, 2020 г.

– Международная конференция на тему «Материалы, конструкции, строительные технологии и инспекция строительства – MSC 2022» – Ханой, Вьетнам 2022 г.

Окончательные результаты диссертационного исследования были доложены и получили одобрение на научных конференциях и семинарах:

– Международная научно-техническая конференция «Строительство и Архитектура: Теория и практика инновационного развития» САТРИД – Махачкала, 2023 г.

– Расширенное заседание кафедры строительной механики ФГБОУ ВПО ВГТУ – Воронеж, 11 декабря 2023 г.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 12 научных статьях, из них 4 – в изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК РФ и приравняемых к ним (3 индексируются в международных базах Web of Science и Scopus). По теме диссертации получены 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, обоснована научная новизна и практическая значимость. Изложены основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации работы.

В первой главе представлен литературный обзор по теме диссертации. Описаны основные этапы развития методов расчета колебаний конструктивно-нелинейных механических систем. Рассмотрены варианты постановки задачи о действии подвижной нагрузки. Изложены известные способы моделирования действия

инертной движущейся нагрузки на балочные системы в современных конечно-элементных комплексах. Приведены основные принципы и примеры верификации расчетных моделей балочных систем при подвижной нагрузке экспериментальными методами.

Во второй главе представлена принятая расчетная схема и математическая модель поведения конструктивно-нелинейной упруго опертой балочной системы при движущейся нагрузке. На примере задачи моделирования колебаний недеформируемого упруго опертого стержня рассмотрены различные подходы к построению вычислительного алгоритма, учитывающего включение и выключение ограничительных опор. Показано, что использование традиционного метода Галеркина для аппроксимации решения уравнения колебаний балки приводит к вычислительной неустойчивости при моделировании ограничительных опор упругими связями большой жесткости. На основе модифицированной математической модели построен вычислительный алгоритм с изменяющимися граничными условиями с использованием кусочно-линейных базисных функций, позволяющий избежать вычислительных трудностей при неблагоприятном сочетании параметров и включении в работу ограничительных опор.

Для реализации поставленной задачи, в качестве расчетной схемы принята балка со свободными концами, опертая в общем случае на произвольное количество упругих и ограничительных опор с различной жесткостью. Плавность приложения нагрузки обеспечивается переходными панелями, которые служат только для передачи нагрузки на балку. Их масса и собственная изгибная жесткость пренебрегается. На концах балки находятся ограничительные жесткие опоры с зазорами Δ_1 и Δ_2 . Предполагается, что по балке движется с постоянной скоростью сила, изменяющаяся во времени $P_i(t)$. При движении нагрузки вертикальные зазоры могут замкнуться и далее разомкнуться, т.е. концы балки могут поочередно или одновременно опереться на жесткие опоры или оторваться от них (рисунок 1).

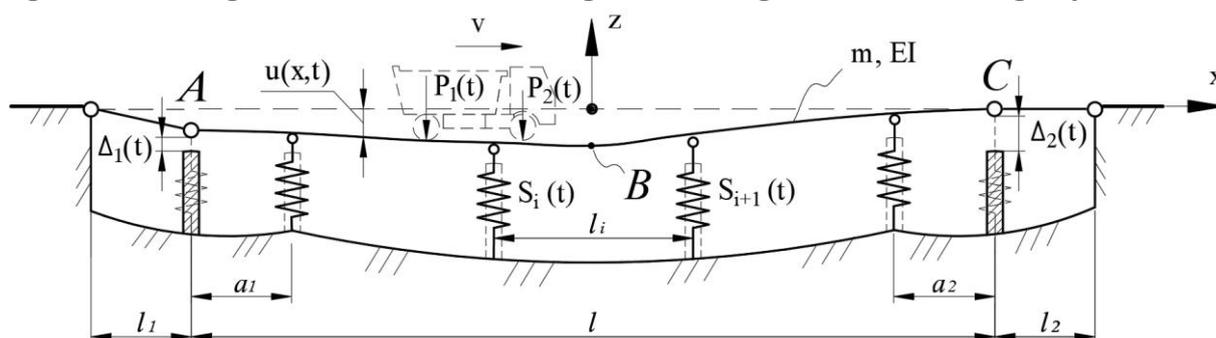


Рисунок 1 – Расчетная схема

Математическая модель для данной расчетной схемы может быть записана в виде начально-краевой задачи для неизвестной функции $u(t, x)$ - задающей полное движение стержня в неподвижной системе координат при условии, что угол поворота стержня мал.

$$\left\{ \begin{array}{l} m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (1 + \square \frac{\partial}{\partial t}) EJ \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = F \\ \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \left(t, -\frac{l}{2} \right) = 0, \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \left(t, -\frac{l}{2} \right) = 0, \text{ если } u \left(t, -\frac{l}{2} \right) \geq u^* \right. \\ \left. \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \left(t, -\frac{l}{2} \right) = 0, \frac{\partial u}{\partial t} \left(t, -\frac{l}{2} \right) = 0, \text{ если } u \left(t, -\frac{l}{2} \right) < u^* \right. \right. \\ \left. \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \left(t, \frac{l}{2} \right) = 0, \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \left(t, \frac{l}{2} \right) = 0, \text{ если } u \left(t, \frac{l}{2} \right) \geq u^* \right. \right. \\ \left. \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \left(t, \frac{l}{2} \right) = 0, \frac{\partial u}{\partial t} \left(t, \frac{l}{2} \right) = 0, \text{ если } u \left(t, \frac{l}{2} \right) < u^* \right. \right. \\ u(t=0) = 0, \quad \frac{du}{dt}(t=0) = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

F – распределенные силы, приложенные к балке; u^* – координата верхней части крайних опор; m – погонная масса балки; EJ – изгибная жесткость; \square – коэффициент внутреннего трения; l – длина балки. Граничные условия соответствуют условиям балки со свободными концами, если зазор ограничительных опор не выбран, и условиям с шарнирно закрепленными концами, когда балка лежит на опоре.

Для моделирования колебаний балочных систем часто используется та или иная модификация классического метода Галеркина с разложением решения в ортогональный базис. Дополнительные трудности при реализации метода Галеркина для рассматриваемой математической модели связаны с тем, что по концам балочной системы размещены ограничительные опоры. Это приводит к необходимости менять базисные функции в ходе динамического нагружения.

Часто проблему смены граничных условий решают заменой в модели ограничительных опор – упругими связями с очень высоким коэффициентом жесткости. Результаты численных исследований показывают, что включение в работу упругих связей с очень высокой жесткостью приводит к вычислительной неустойчивости при использовании глобальных базисных функций.

Введем переменные $u_1 = u$, $u_2 = \frac{\partial u}{\partial t}$, $u_3 = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$. Данное преобразование позволяет записать модель в виде системы уравнений со 2-ым порядком пространственных переменных.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u_1}{\partial t} = u_2 \\ m \frac{\partial u_2}{\partial t} + EJ \frac{\partial^2 u_3}{\partial x^2} + \square EJ \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial^2 u_3}{\partial x^2} = F \\ \frac{\partial u_3}{\partial t} = \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} \\ u_1(t=0, x) = 0, \quad u_2(t=0, x) = 0, \quad u_3(t=0, x) = 0. \\ \left(u_3 \left(t, -\frac{l}{2} \right) = 0, \frac{\partial u_3}{\partial x} \left(t, -\frac{l}{2} \right) = 0, \text{ если } u \left(t, -\frac{l}{2} \right) \geq u^* \right. \\ \left. \left(u_3 \left(t, -\frac{l}{2} \right) = 0, u_2 \left(t, -\frac{l}{2} \right) = 0, \text{ если } u \left(t, -\frac{l}{2} \right) < u^* \right. \right. \\ \left. \left(u_3 \left(t, \frac{l}{2} \right) = 0, \frac{\partial u_3}{\partial x} \left(t, \frac{l}{2} \right) = 0, \text{ если } u \left(t, \frac{l}{2} \right) \geq u^* \right. \right. \\ \left. \left(u_3 \left(t, \frac{l}{2} \right) = 0, u_2 \left(t, \frac{l}{2} \right) = 0, \text{ если } u \left(t, \frac{l}{2} \right) < u^* \right. \right. \end{array} \right. \quad (2)$$

Математическая модель (2) сформулирована для распределенных сил $F(t, x)$, приложенных к балке. Чтобы сформулировать эту модель в терминах сил, приложенных в точке, используем технику обобщенных функций. Функции u_1, u_2, u_3 рассматриваются как обобщенные для произвольной бесконечно-дифференцируемой пробной функции $\psi(x)$ из пространства основных функций. Проинтегрировав два раза по x второе и третье уравнение, записанное для обобщенных функций, получим в правой части функции переменных модели на концах балки. Учитывая граничные условия, запишем систему уравнений (3).

$$\begin{cases} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{\partial u_1}{\partial t} \psi dx - \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} u_2 \psi dx = 0 \\ m \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{\partial u_2}{\partial t} \psi dx - (1 + \square \frac{\partial}{\partial t}) EJ \left(\int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{\partial u_3}{\partial x} \frac{\partial \psi}{\partial x} dx - \left(u_3 \frac{\partial \psi}{\partial x} + \theta(u^* - u_1) \frac{\partial u_3}{\partial x} \psi \right) \Big|_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \right) = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} F \psi dx \\ \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{\partial u_3}{\partial t} \psi dx x + \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{\partial u_2}{\partial x} \frac{\partial \psi}{\partial x} dx - \left(\frac{\partial u_2}{\partial x} \psi + \theta(u^* - u_1) u_2 \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) \Big|_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Используя кусочно-постоянную функцию Хэвисайда, зададим изменение граничных условий в зависимости от перемещений концов балки. Сосредоточенные силы моделируются с помощью δ – функций, амплитуда которых равна величине действующей силы.

Система уравнений (3) с учетом возможности описания сосредоточенных сил является математической моделью движения универсальной балочной системы со свободными концами. И задача состоит в нахождении гладких функций u_1, u_2, u_3 , которые удовлетворяли бы уравнениям модели для произвольной бесконечно-дифференцируемой пробной функции из пространства основных функций. Обратим внимание, что никаких требований на выполнение граничных условий на функции u_1, u_2, u_3 не накладываемся, так как граничные условия уже учтены в уравнениях модели (3).

Построим на отрезке $\left[-\frac{l}{2}, \frac{l}{2}\right]$ сетку узлов $x_p, p = 1 \div P$, так чтобы $x_1 = -\frac{l}{2}, x_P = \frac{l}{2}$. Сетка может быть равномерной или неравномерной. Эта сетка разбивает отрезок $\left[-\frac{l}{2}, \frac{l}{2}\right]$ на интервалы. Свяжем с каждым узлом x_p функцию $H_p(x)$, которая равна 1 в точке x_p , и равна 0 во всех других точках сетки и линейна на каждом интервале. Определим вектор-функцию $u^n = (u_1, u_2, u_3)^T$. Решение будем искать в виде:

$$u^n(t, x) = \sum_p H_p(x) T^{p,n}(t) = H_p T^{p,n}. \quad (4)$$

В последнем равенстве мы воспользовались соглашением о суммировании: если в выражении индекс встречается дважды, то подразумевается суммирование по всем значениям этого индекса. В качестве пробных функций возьмем те же кусочно-линейные функции, нумеруемые индексом $pw = 1 \div P$. pw - индекс, обозначенный двумя буквами для удобства. Подставив эти выражения в (3), аналогично методу Галеркина получим для неизвестных функций $T^{p,n}$ задачу Коши для системы ОДУ

$$\begin{aligned} D_{p,n}^{pw,nw} \frac{\partial T^{p,n}}{\partial t} + B_{p,n}^{pw,nw} T^{p,n} &= f^{pw,nw} \\ T^{p,n}(t=0) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Решив эту задачу Коши для системы ОДУ, найдем решение по (4). Изложенный вычислительный алгоритм реализован в среде Matlab для выполнения параметрических исследований колебания конструктивно-нелинейной упруго опертой балочной системы при движущейся нагрузке.

В третьей главе описаны цели и задачи эксперимента, программа проведения испытаний. Представлена спроектированная и изготовленная автором экспериментальная установка, включающая в себя модель конструктивно-нелинейной балочной системы, подвижную тележку, тяговое устройство и систему сбора данных. Описан метод определения прогибов балки с помощью оптического измерителя. Выполнен анализ свободных и вынужденных колебаний модели балочной системы для апробации оптического измерителя и индукционных датчиков. Выполнена серия экспериментов для анализа динамического поведения конструктивно-нелинейной упруго опертой балки при движущейся нагрузке. Построены графики перемещений характерных точек динамической системы при варьировании жесткости балки, скорости тележки, жесткости опор.

Для верификации численных исследований автором разработана и изготовлена испытательная установка, которая позволяет моделировать колебания конструктивно-нелинейной балочной системы при движущейся нагрузке. Материал и сечение балки, длины пролетов и жесткость упругой опоры выбраны таким образом, чтобы обеспечить геометрическую и физическую линейность системы. Общий вид установки представлен на рисунке 2.

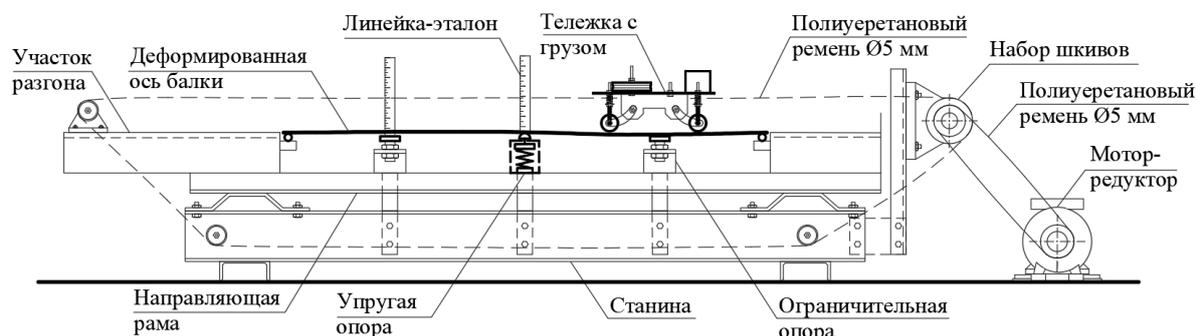


Рисунок 2 – Конструктивная схема установки с движущейся нагрузкой

Тележка с грузами приводится в движение электрическим приводом с ременной передачей. Скорость движения тележки может варьироваться в широком диапазоне в зависимости от диаметра шкива на приводном валу и диаметра ведомого шкива. Движение тележки начинается и заканчивается на подъездных панелях, что обеспечивает постоянную скорость в зоне измерений (рисунок 3).



Рисунок 3 – Общий вид экспериментальной установки

Для измерения перемещений использован оптический метод определения пространственных координат с применением фотометрической установки. В ходе испытаний массив цифровых изображений, полученных оптическим прибором, записывался на компьютер, после чего обрабатывался компьютерной программой в среде Matlab с использованием динамического пакета Simulink. Вычисление координат точек балки осуществляется с помощью корреляции яркостных образов равноотстоящих точек в пространстве. Чтобы установить масштаб изображения и перейти от координат к перемещениям, использована линейка-эталон, равноудалённая от камеры наряду с расчётными точками системы (рисунок 4). Максимальная погрешность оптического метода получена на основании анализа результатов серии экспериментов при различной величине нагрузки и составляет 0,1 мм.

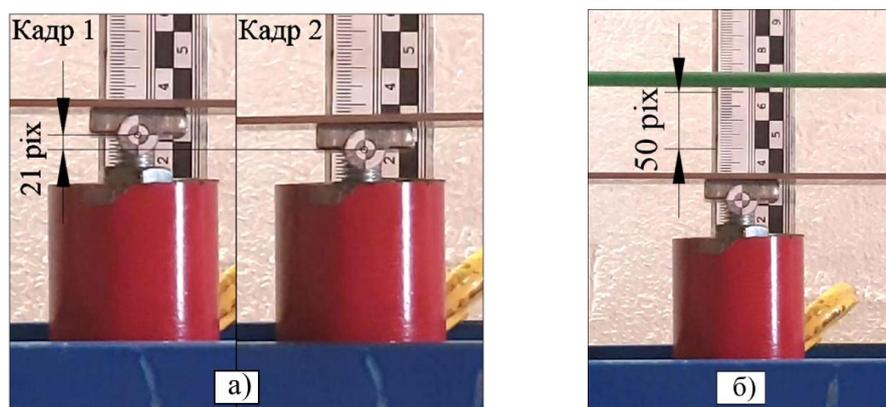


Рисунок 4 – Оптический способ измерения

а – изменение координат точки; б – определение масштабного коэффициента

В четвертой главе рассмотрен способ моделирования воздействия подвижной неинертной нагрузки на конструктивно-нелинейную упруго опертую балочную систему с помощью группы узловых сил на линии проезда в программе Midas NFX. Определены границы его применимости. Установлены особенности моделирования динамического взаимодействия движущейся нагрузки и конструктивно-нелинейной балочной системы с использованием алгоритмов контакта. В среде расчетного комплекса LS-Dyna разработана совместная КЭ модель экспериментальной балочной системы и подвижной тележки для верификации. Исследовано влияние параметров конструкционного демпфирования и демпфирования контактных сил на сходимость и точность решения. Даны рекомендации по выбору способа подавления деформаций песочных часов при использовании КЭ оболочки для моделирования тела балки. Предложена упрощенная модель транспортного средства, которая существенно снижает затраты вычислительного времени по сравнению с детализированными моделями автомобилей. Приведены результаты тестирования конечно-элементного комплекса LS-Dyna на известных задачах свободных и вынужденных колебаний балочных систем.

В настоящее время ни один из широко известных КЭ комплексов не имеет верифицированного модуля для выполнения динамических расчетов несущих систем на действие подвижной инертной нагрузки. Для учета инерции груза и эффекта «обратной связи» пользователи зачастую вынуждены использовать

вспомогательные программы, с помощью которых создается динамическая модель движущейся нагрузки для уточнения сил инерции на каждом шаге основного расчета.

Автором предложен современный способ моделирования колебаний движущейся нагрузки и конструктивно-нелинейной балочной системы в LS-Dyna, в котором задача решается в рамках единой КЭ модели. Связь между элементами движущейся нагрузки и балочной системы устанавливается с помощью встроенного алгоритма контакта элементов – метода штрафа.

При использовании данного метода опорные элементы движущейся нагрузки проверяются на каждом шаге динамического расчета на проникание в ведущую поверхность, образованную элементами балочной системы. Геометрически зазор g , определяющий условия проникания, вычисляется программой как кратчайшее расстояние между опорными элементами и сегментами ведущей поверхности (рисунок 5).

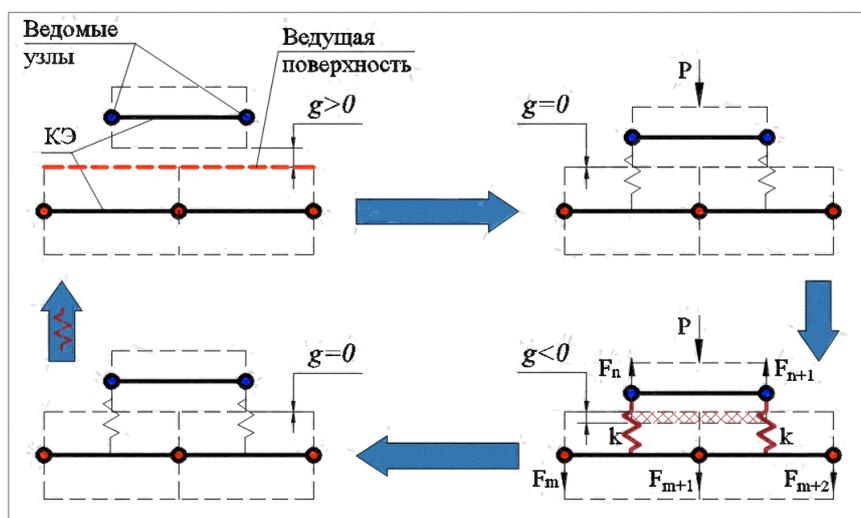


Рисунок 5 – Метод штрафа

Если проникание происходит, то к опорным узлам движущейся нагрузки и к ведущей поверхности прикладывается сила, значение которой пропорционально глубине внедрения.

$$f_i = |g| \times k_i \times n_i, \text{ если } g < 0, \quad (6)$$

где g – зазор, k_i – контактная жесткость i -ого сегмента, n_i – вектор нормали к ведущей плоскости. Сила прикладывается с одной стороны к ведомому узлу, с другой – распределяется между узлами, определяющими сегмент ведущей поверхности согласно принципу равновесия.

В следствии резкого изменения контактной жёсткости от 0 до k_i в момент закрытия зазора, в нелинейных динамических задачах нередко возникают проблемы со сходимостью решения. При моделировании подвижной нагрузки в программе LS-Dyna поверхности контакта подвергаются большому относительному движению, что приводит к высокочастотным осцилляциям контактных сил. Для их подавления и повышения стабильности расчета использован алгоритм вязкого демпфирования контактных сил (VDC).

С целью выполнения верификационных расчетов в программе LS-Dyna разработаны КЭ модели тележки и балки, которые использовались в ходе

экспериментов. Внешние силы и кинематические граничные условия, действующие на тележку во время движения представлены на рисунке 6. Контакт опорных стоек тележки с балкой задан картой AUTOMATIC_BEAMS_TO_SURFACE.

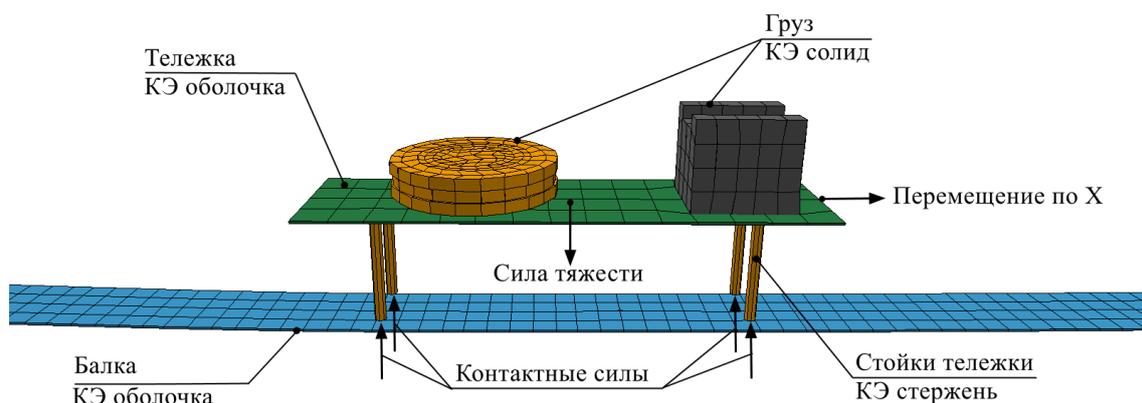


Рисунок 6 – Конечно-элементная модель подвижной нагрузки

Ключевое слово `*DAMPING_GLOBAL` используется для задания конструкционного демпфирования расчетной модели. Коэффициент конструкционного демпфирования $D_s = 10,0$ определен экспериментально методом свободных затухающих колебаний. Описание материалов и элементов, используемых в модели, приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Типы элементов и модели материалов

Объект	Элемент	Тип элемента (LS-DYNA)	Модель материала
Балочная система	Балка и переходные панели	EQ.16: Оболочка с полной схемой интегрирования	001-ELASTIC
	Упругие опоры	2-узловой одномерный элемент	S01-SPRING_ELASTIC
	Ограничительные опоры	2-узловой одномерный элемент	S04-SPRING_NONLINEAR_ELASTIC
Подвижная тележка	Стойки	EQ.1: Балочный элемент Хьюза-Лю	020-RIGID
	Грузы	EQ.1: Объемный элемент	020-RIGID
	Рама	EQ.16: Оболочка с полной схемой интегрирования	020-RIGID

В ходе вычислительных экспериментов для аппроксимации тела балки использованы КЭ оболочки 1-ого порядка с полной и сокращенной схемой интегрирования. В результатах, полученных с применением КЭ с одной квадратурной точкой, было отмечено проявление нефизических деформационных мод с нулевой энергией. В программе LS-Dyna протестированы различные способы контроля и подавления нефизических деформации. Наиболее эффективным оказалось использование полноинтегрированных КЭ оболочки и опции HOURGLASS *CONTROL (тип 8).

При использовании инертных моделей подвижной нагрузки в динамических задачах с высоким уровнем нелинейности, таких как проезд автомобиля по мосту, возникает необходимость выбора относительно малого по времени шага численного интегрирования уравнений движения. В связи с этим использование детализированных моделей транспортных средств потребует очень больших вычислительных ресурсов для выполнения динамического расчета. В тех случаях, когда цель расчета – анализ колебаний балочной системы, автором предложено

использовать упрощенные модели подвижной нагрузки. В таких моделях опорные элементы движущейся нагрузки скользят по поверхности балки при нулевом трении. Нормальная составляющая контактных сил прикладывается к ближайшим узлам на полосе проезда с учетом положения нагрузки на каждом временном шаге. При этом автомобиль реализован в виде упрощенной модели, состоящей из жестких тел и упругих дискретных элементов, моделирующих работу подвески, что дополнительно снижает трудоемкость задачи (рисунок 7).

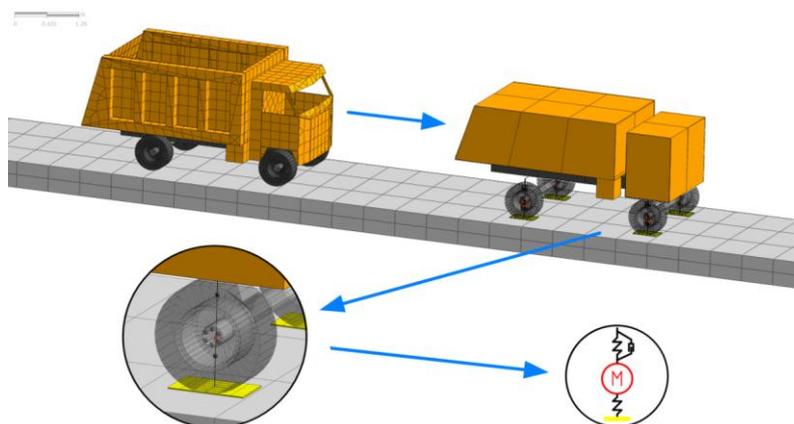


Рисунок 7 – Детализированная и упрощенная модель грузовика

Податливость шин задается с помощью упругих связей, тогда как алгоритмы контакта между элементами балки и следа колеса служат только для передачи нормальных сил взаимодействия.

В пятой главе с помощью экспериментальной установки выполнена верификация предложенного вычислительного алгоритма и результатов конечно-элементного моделирования колебаний шарнирно опертой конструктивно-нелинейной балочной системы при подвижной нагрузке. Выполнен параметрический анализ упруго опертой балочной системы с ограничительными опорами по концам, который позволил установить рациональные соотношения параметров. На примере известного решения задачи колебаний балочной системы при движении подрессоренного груза через одиночную неровность, выполнена верификация методики моделирования неровностей дорожного покрытия пространственными КЭ с ортотропными свойствами. Адаптированная методика КЭ моделирования совместных колебаний балочной системы и инертной подвижной нагрузки апробирована для решения прикладных задач: расчета балок галереи на динамическую нагрузку от сбрасывающей тележки; расчета неразрезного сталежелезобетонного пролетного строения на проезд колонны автомобилей.

Верификация предложенных способов моделирования колебаний конструктивно-нелинейной упруго опертой динамической системы выполнена сопоставлением результатов экспериментов с результатами численных исследований на примере шарнирно опертой балки с упругими и ограничительными опорами (рисунок 8). Цифрами I – IV на рисунке отмечены сечения балки, перемещения которых определены оптическим методом в ходе эксперимента.

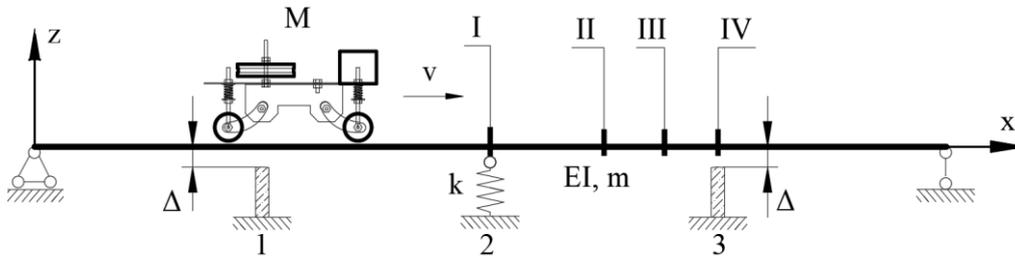


Рисунок 8 – Расчетная схема экспериментальной модели балочной системы

Ограничительные опоры установлены с зазором $\Delta = 2,1$ мм. Общая масса тележки – 2,73 кг. Нагрузка на заднюю ось тележки составляет 15,9 Н, на переднюю ось – 10,9 Н. Расстояние между осями – 160 мм. Результаты получены для тележки с жесткой подвеской. В таблице 2 приведены основные характеристики балочной системы.

Таблица 2 – Параметры экспериментальной модели балочной системы

Сечение, мм	Масса балки, кг	Длина балки, мм	Координаты опор, мм			Жесткость опоры, Н/м	Скорость тележки, м/с		
			x_1	x_2	x_3		v_1	v_2	v_3
$b \times h$	m	L				k			
38,0×2,0	0,715	1200	176	603	997	4240	0,07	0,38	0,45

В разработанной автором программе в Matlab при решении данной задачи использована постановка Крылова-Киселева о действии подвижной нагрузки, согласно которой давление на балку постоянно и равно весу груза. Докажем корректность этого допущения для разработанной в рамках проведения экспериментальных исследований модели балочной системы. На рисунке 9 представлен график изменения динамического давления, действующего на балку со стороны тележки, построенный в LS-Dуна для инертной модели подвижной нагрузки.

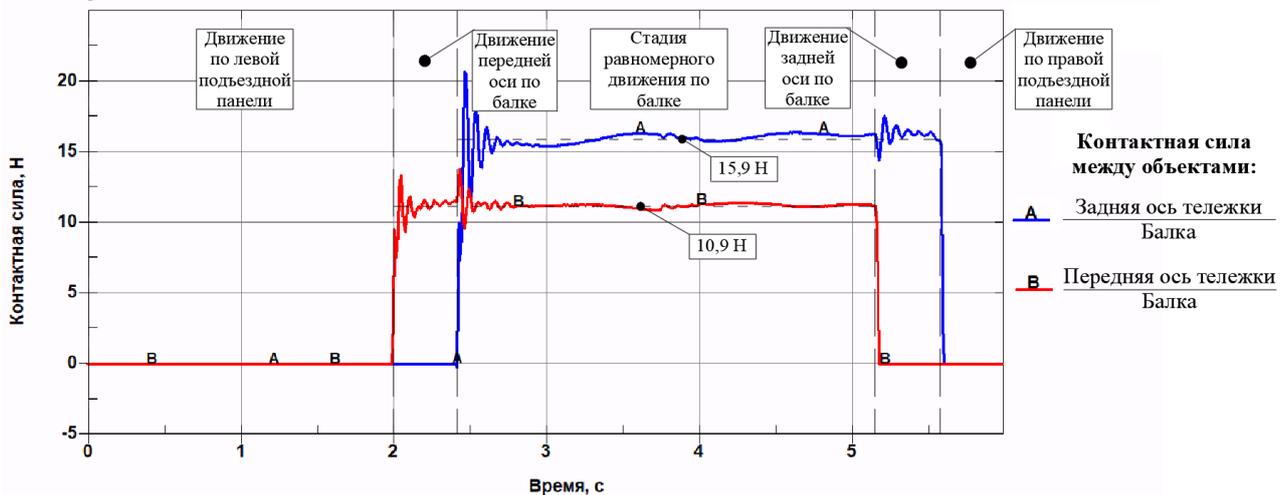


Рисунок 9 – График изменения динамического давления

В моменты заезда передней и задней оси тележки на балочную систему возникают колебания динамического давления, которые быстро затухают. При дальнейшем равномерном движении тележки по балке динамическое давление со стороны задней и передней оси отличается от статического не более чем на 3,7%, что не оказывает существенного влияния на характер колебания динамической системы.

В соответствии с системным подходом к верификации, анализ результатов выполнен для ряда характерных сечений балочной системы: на упругой опоре, на

ограничительной опоре и в пролете. На рисунках 10, 11 представлены совмещенные графики колебаний балочной системы при скорости тележки $v = 0,38$ м/с, полученные расчетным путем и в ходе эксперимента.

Наилучшее совпадение результатов численного и экспериментального моделирования наблюдается в сечении балки на упругой опоре. Максимальная погрешность расчетной модели при определении амплитуды колебаний балки наблюдается вблизи ограничительной опоры в сечении III и составляет 9,4%. Увеличение погрешности при определении амплитуды колебаний в LS-Dyna и Matlab в этом сечении связано с допущением о точечном взаимодействии балки с ограничительной опорой.

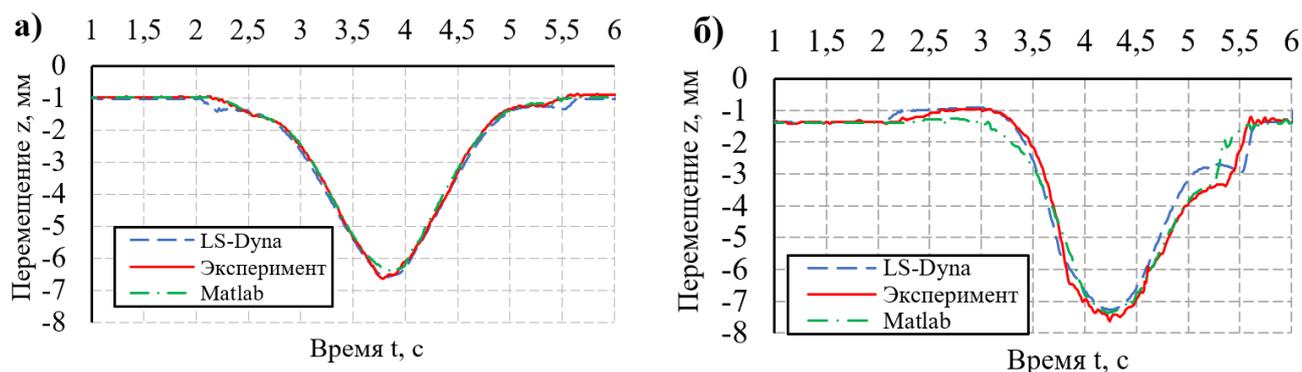


Рисунок 10 – Вертикальные перемещения: а – сечение I; б - сечение II

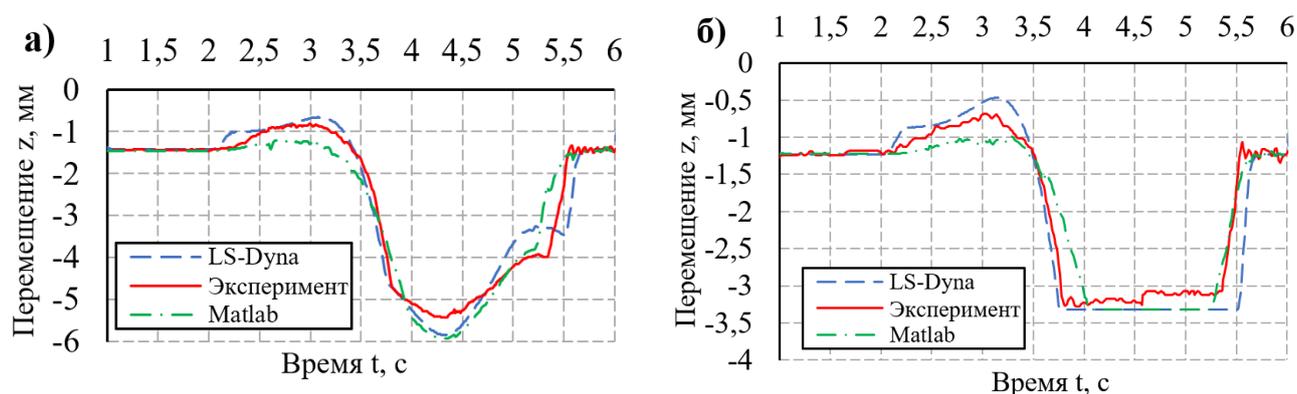


Рисунок 11 – Вертикальные перемещения: а – сечение III; б - сечение IV

Анализ графиков показывает, что предложенные подходы позволяют численно моделировать колебания конструктивно-нелинейной упруго опертой балочной системы с удовлетворительной точностью. В то же время, использование связей с очень большой жесткостью для моделирования работы ограничительных опор в LS-Dyna приводит к скачкообразному изменению сосредоточенных сил, что оказывает негативное влияние на устойчивость решения. Разработанный вычислительный алгоритм, реализованный в среде Matlab, позволяет избежать вычислительных трудностей, связанных с резким включением в работу ограничительных опор.

С использованием разработанного вычислительного алгоритма выполнена серия расчетов для изучения влияния параметров многопролетной конструктивно-нелинейной упруго опертой балочной системы с ограничительными опорами по концам на характер колебаний. Расчетная схема балочной системы для выполнения параметрических исследований изображена на рисунке 12.

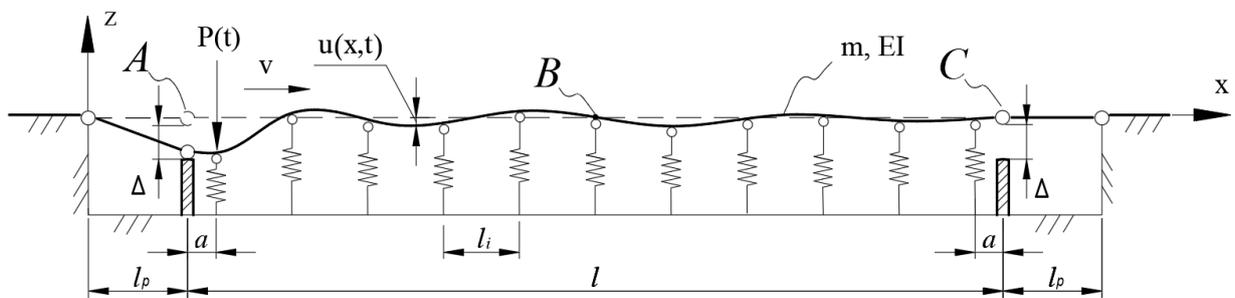


Рисунок 12 – Расчетная схема балочной системы для параметрических исследований

Параметры динамической системы приняты следующими: $l = 174\text{м}$ – длина балки; $m = 0,604\text{ т/м}$ – погонная масса балки; $l_i = 16,2\text{м}$ – пролет балки; $a = 6,0\text{м}$ – длина консольных участков; $l_p = 15,45\text{м}$ – длина переходных панелей; $c = 2,43 \times 10^6\text{ Н/м}$ – жёсткость упругих связей; $P_0 = 4,0 \times 10^5\text{ Н}$, $A = 2,0 \times 10^4\text{ Н}$, $\omega = 12,56\text{ рад/с}$ – параметры динамической нагрузки: $P(t) = P_0 + A\sin(\omega t)$; $\varkappa = 0,01$ – коэффициент внутреннего трения. В ходе расчетов варьировались: скорость нагрузки $v = 10 \div 20\text{ м/с}$; величина зазоров по концам балки $\Delta = 0,05 \div 0,2\text{ м}$; изгибная жёсткость $EI = 1 \times 10^8 \div 3,15 \times 10^{10}\text{ Н} \times \text{м}^2$.

Устройство ограничительных опор по концам упруго опертых балок часто обусловлено необходимостью ограничения прогибов консольных участков. При проектировании ограничительных опор важно выбрать подходящее значение величины зазора Δ , так как с его уменьшением возрастает положительный момент в концевой части. В ходе серии численных экспериментов установлен рекомендуемый интервал значений величины зазора ограничительных опор, при котором изгибающие моменты противоположного знака в консольном участке балки при динамическом нагружении равны по модулю:

$$\Delta_0 = (0,3 \div 0,45)\delta_0 P,$$

где δ_0 податливость свободного края балки при статической нагрузке на конце консоли. Получен интервал соотношения жесткости балки EI к пролету l_i , обеспечивающий выполнение требований ограничения прогибов балки между упругими опорами $U_{max} < l_i/400$:

$$EI/l_i = 5,4 \times 10^7 \div 9,0 \times 10^7 \frac{\text{Н} \times \text{м}^2}{\text{м}}, \text{ при } l_i = 11,5 \div 27,0\text{ м}.$$

Полученные соотношения позволяют подбирать рациональные параметры аналогичных несущих систем исходя из практических потребностей.

Способ совместного моделирования инертной подвижной нагрузки и балочной системы в программе нелинейной динамики LS-Dyna использован для расчета центральной части сталежелезобетонного неразрезного моста через реку Кальмиус по проспекту Ильича, г. Донецк (опоры 4-5-6-7), выполненного по схеме $33,84 + 37,6 + 33,84$ (м). При выборе динамической модели подвижного состава за основу принята автомобильная нагрузка Н-30 по нормам СН 200-62, которая представляет собой колонну следующих друг за другом трехосных грузовиков весом по $30,0\text{ тс}$. Вместо грузовика КраЗ-257, автором использована динамическая модель автомобиля КАМАЗ-6520 с подвеской полной массой $M = 33,1\text{ т}$. В пределах пролетного строения скорость движения колонны принята постоянной $v = 60\text{ км/ч}$.

С учетом рекомендаций отраслевых методических документов (ОДМ 218.11.001-2015) в дорожном покрытии заданы неровности глубиной 10мм и длиной 1м на каждые 10м. На рисунке 13 представлены динамические нормальные напряжения в главных балках, возникающие при встречном проезде двух колонн моделей автомобилей КАМАЗ-6520.

Наибольшие нормальные напряжения поясах главных балок превышают расчетное сопротивление материала для мостовой стали М16С ($\sigma_{max} = 237,9\text{МПа} > R_y = 213,6\text{МПа}$) – перегруз по несущей способности 11,3%. Наибольший вертикальный прогиб в главных балках пролетного строения от нормативных значений нагрузок составил $f = 64,1\text{мм} < f_{max} = 33840/400 = 84,6\text{мм}$.

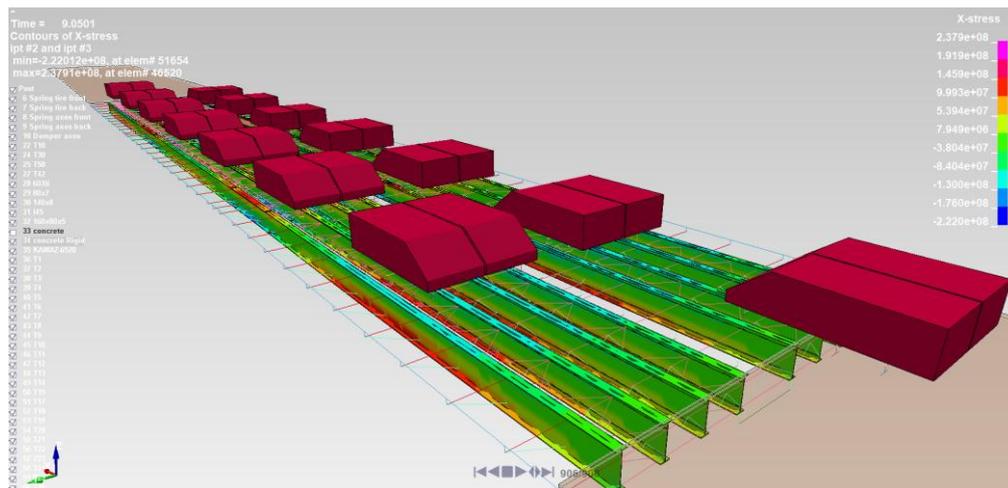


Рисунок 13 – Динамические напряжения X-stress в главных балках

Предложенный подход моделирования инертной подвижной нагрузки с помощью алгоритмов контакта элементов апробирован для анализа колебаний конвейерной галереи, оборудованной передвижной сбрасывающей тележкой. Опоры балок выполнены с применением тарельчатых пружин, которые часто используются для нейтрализации отрицательного воздействия возможных осадок фундаментов.

В расчете учтен вес конструкций и подвижного оборудования. В соответствии с технологическим заданием и действующей нормативной документацией к балке приложена распределенная статическая и динамическая нагрузка от транспортируемого груза, ленты, рядовых и центрирующих роликоопор.

Динамическая система имеет следующие эксплуатационные параметры: длина балки $l_6 = 90\text{м}$, шаг упругих опор $l_i = 6\text{м}$, жесткость упругих опор $k = 1,09 \times 10^6\text{Н/м}$. Статическая масса сбрасывающей тележки $M = 4,15\text{ т}$. Расстояние между осями $L = 2,2\text{м}$. Коэффициент конструкционного демпфирования $D_s = 5,0$. На рисунке 14 представлен график зависимости динамического коэффициента от скорости сбрасывающей тележки.

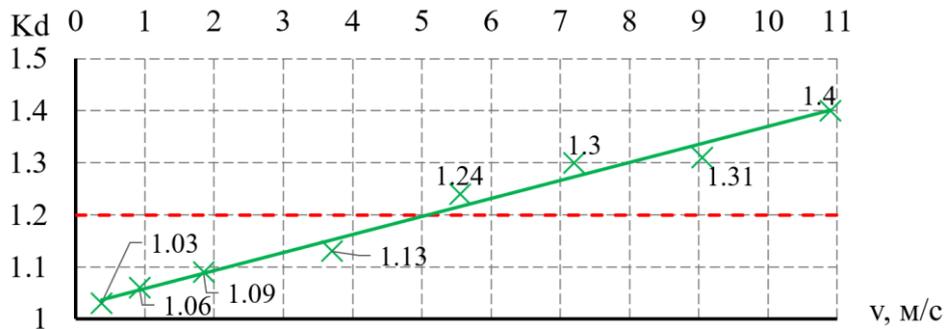


Рисунок 14 – График зависимости K_d от скорости тележки

Согласно нормативной документации, динамический характер нагружения от опор ленточного конвейера без подвижной тележки при условии отсутствия резонанса допускается учитывать введением коэффициента $K_d = 1,1 \div 1,2$ к статической нагрузке. Коэффициент динамичности превышает рекомендуемые значения для расчета ленточных конвейеров при скорости тележки $v > 5,1$ м/с. Тележки с такой скоростью движения не применяются для разгрузки агрокультур, однако могут использоваться в перспективе в горнодобывающей промышленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Построен вычислительный алгоритм решения дифференциальных уравнений в частных производных с изменяющимися граничными условиями, который позволяет избежать вычислительной неустойчивости при опирании балки на ограничительные опоры.

2. Разработана программа в среде Matlab, позволяющая выполнять параметрический анализ колебаний конструктивно-нелинейных упруго опертых балочных систем, которые широко используются в качестве расчетных схем при решении различных инженерных задач.

3. Спроектирована и изготовлена экспериментальная установка для верификации предложенной методики численного моделирования колебаний рассматриваемых балочных систем, в которой, в отличие от известных аналогов, предусмотрена возможность устройства дополнительных промежуточных упругих и ограничительных опор с регулируемой жесткостью и величиной зазора.

4. Разработаны рекомендации по выбору типа конечных элементов балки, упругих и ограничительных опор, назначению подходящих параметров демпфирования и параметров алгоритма контакта для построения адекватной совместной модели инертной подвижной нагрузки и несущей системы в программном комплексе нелинейной динамики LS-Dyna.

5. Проведена серия лабораторных испытаний и численных экспериментов для поэтапной верификации предложенных способов моделирования конструктивно-нелинейных колебаний упруго опертых балочных систем при движущейся нагрузке. Показано, что в разработанных моделях погрешность определения перемещений характерных сечений балки не превышает 10%.

6. Установлены области рациональных соотношений параметров для подбора значений жесткости балки и упругих опор, длины пролетов, величины зазора ограничителей хода при движущейся нагрузке.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В изданиях, рекомендованных ВАК и приравняваемых к ним:

1. Ravodin, I. Verification of the modeling results of oscillations of an elastic-supported system with displacement limiters under moving load / I. Ravodin, S. Gridnev, Yu. Skalko, V. Safronov, T. Van Tran Thi // Australian Journal of Structural Engineering. – 2024. – 25 (1). – P. 98-105.

2. Гриднев С.Ю. Экспериментальный анализ колебаний натурной модели упруго-опертой динамической системы с ограничителями хода / С.Ю. Гриднев, И.В. Раводин // Строительная механика и конструкции. – 2021. – Вып. № 2 (29). – С. 92-103.

3. Gridnev S. Simulation of vibrations of a continuously elastic supported rod with varying boundary conditions under the action of a movable load/ S. Gridnev, Yu. Skalko, I. Ravodin, V. Yanaeva // MATEC Web of Conferences. – 2018. – 196. – 01053.

4. Gridnev S. Finite element modeling of a moving load using contact conditions / S. Gridnev, I. Ravodin // MATEC Web of Conferences. – 2018. – 196. – 01044.

Зарегистрированные программы для ЭВМ:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017664050. Рос. Федерация. Расчёт колебаний упруго опертого стержня с ограничителями хода под действием движущейся нагрузки. / С.Ю. Гриднев, И.В. Раводин; заявитель и правообладатель ВГТУ (RU). – №2017660678; заявл. 23.10.17; опубл. 14.12.17, Реестр программ для ЭВМ.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615052. Рос. Федерация. Численный анализ нелинейных колебаний упруго опертой деформируемой системы с ограничительными опорами по концам. / С.Ю. Гриднев, И.В. Раводин, Ю.И. Скалько, В.В. Янаева; заявитель и правообладатель ВГТУ (RU). – №2018612057; заявл. 05.03.18; опубл. 23.04.18, Реестр программ для ЭВМ.

В других научных изданиях:

1. Раводин, И.В. Разработка оптимального вычислительного алгоритма для параметрического анализа конструктивно-нелинейных колебаний упруго-опертых систем / И.В. Раводин, С. Ю. Гриднев // сб. мат. XXIV междунар. науч.-техн. конф. – Тула: [б. и.], 2023. – С.55-60.

2. Раводин, И.В. Анализ моделей и методов исследования поведения конструктивно-нелинейных систем / И.В. Раводин, С.Ю. Гриднев // сб. мат. XXIII междунар. науч.-техн. конф. – Тула: [б. и.], 2022. – С.113-117.

3. Гриднев, С.Ю. Выбор и обоснование конечно-элементной модели движущейся нагрузки / С.Ю. Гриднев, И.В. Раводин // сб материалов XXII междунар. науч.-техн. конф. – Тула: [б. и.], 2021. – С.74-78.

4. Gridnev S. Determination of dynamic parameters of the elastically supported beam system model by optical and numerical methods / S. Gridnev, I. Ravodin, V. Volkov // XXIX R-P-S Seminar 2020, Theoretical Foundation of Civil Engineering – Wroclaw, Poland, 2020. – 10 p.

5. Гриднев, С.Ю. Разработка и изготовление установки для исследования особенностей колебаний упруго-опертых динамических систем / С.Ю. Гриднев, И.В. Раводин // сб. мат. XXI междунар. науч.-техн. конф. – Тула: [б. и.], 2020. – С. 68-71.

6. Gridnev S. Development of a Model to Moving Load For Analyzing Oscillations of a Bearing System with Elastic Constraints in the Finite Element Complex Midas NFX / S. Gridnev, Yu. Scalko, I. Ravodin // *Mechanika 2019: Proceedings of the 24th Int. Sc. Conf.*, Kaunas 17.05.2019 – Kaunas University of Technology, 2019. – P. 1-8.

7. Гриднев, С.Ю. Моделирование колебаний упруго опертой динамической системы с ограничителями хода / С.Ю. Гриднев, Ю.И. Скалько, И.В. Раводин, В.В. Янаева // *Строительная механика и конструкции*. – 2017. – Вып. № 1(14). – С. 108-117.

8. Гриднев, С.Ю. Колебания упруго опертой динамической системы с ограничителями хода при движении нагрузки в одном направлении / С.Ю. Гриднев, Ю.И. Скалько, И.В. Раводин, В.В. Янаева // сб. мат. XVIII междунар. науч.-техн. конф. – Тула: [б. и.], 2017. – С. 57-59.

Подписано в печать 04.09.2024 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага писчая. Объем 1,0 п. л. Тираж 100 экз. Заказ № _____.
Отпечатано: отдел оперативной полиграфии
Воронежского государственного технического университета
394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84